



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械工程材料

Mechanical Engineering Materials

第③版

© 王章忠 主编

非外借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械 工 程 材 料

第 3 版

主 编	王章忠		
副主编	乔 斌	丁红燕	胡耀华
参 编	姜世杭	谈淑咏	王 珏
主 审	潘 冶	陶 杰	



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是机械类(兼含近机类)专业的技术基础课教材。本书主要讲授零件在不同工作条件下的性能要求以及工程技术人员必备的材料学基本理论和材料知识,介绍了各类工程材料的成分、组织结构与加工工艺及性能特点和应用范围,并结合实例说明了选用材料的原则和方法。全书共14章,包括:材料的性能及应用意义、材料的结构、材料的凝固与结晶组织、材料的变形断裂与强化机制、铁碳合金相图及应用、钢的热处理、钢铁材料、有色金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料、功能材料、材料表面技术、工程材料的选用与发展。在附录中列出了材料工程主要相关国家标准名录和材料学主要相关 Internet 信息资源,各章后均附有分析应用型习题,全书引用最新国家标准,并力求体现“宽、精、新、应用”的特色,旨在重点培养学生选材用材的能力。

本书主要供机械、仪器、能源动力、化学工程、航空航天、兵器、农业工程、工程力学、管理工程、环境工程等各类专业的大学本科学生使用,也可作为高等专科学校、高等职业学院及业余职工大学相关专业的教材和有关专业科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料/王章忠主编. —3版. —北京:机械工业出版社,2018.9
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-60449-5

I. ①机… II. ①王… III. ①机械制造材料-高等学校-教材
IV. ①TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 156148 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:丁昕祯 责任编辑:丁昕祯 安桂芳 刘丽敏

责任校对:郑婕 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019 年 1 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.5 印张·480 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60449-5

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前言

FOREWORD

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是机械工业出版社出版的《机械工程材料》（王章忠主编）的第3版，适于用作机械、仪器、能源动力、化学工程、航空航天、兵器、农业工程、工程力学、管理工程、环境工程及其他相关专业大学本科生必修的工程材料类课程的教材。

本书第3版修订的指导思想是：适应新工科发展的应用型人才培养模式要求，全面提高学生“理论联系实际、注重工程应用、发展终身学习、适应经济社会”的能力。本书在保持第2版的体系、结构、特色和主要内容的基础上，对第二章进行了修订，第八章进行了重新编写，全书内容适度修改，标准全部更新。本书的主要特点是：根据中国制造2025、战略新兴产业等对材料技术的新发展、新要求，新增了新材料、新工艺、新技术的相关知识；全面介绍了金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料的共性与个性特点，并注意突出金属材料重点；体现了“大工程”意识，培养学生的“材料、设计、制造”一体化理念；为便于持续学习，在附录中还列出了材料工程主要相关国家标准名录和材料学主要相关Internet信息资源。全书共14章，建议教学时数为40~60学时。

在第3版的修订过程中，参阅了国内外出版的有关资料，在此对全部文献的作者表示衷心感谢！

本书的编写分工如下：南京工程学院王章忠教授编写绪论、第一章、第十二至第十四章及第七章的第一至六节，淮海工学院乔斌教授编写第三、四章及第七章第七节，淮阴工学院丁红燕教授编写第五、六章，扬州大学姜世杭教授编写第九至十一章，西北农林科技大学胡耀华教授编写第二章，南京工程学院谈淑咏副教授编写第八章，王珏副教授编制全书课件。全书由王章忠主编，东南大学潘冶教授、南京航空航天大学陶杰教授主审。

由于编者水平有限，书中不妥与错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

目录

CONTENTS

前言		习题	85
绪论	1	第六章 钢的热处理	86
第一章 材料的性能及应用意义	6	第一节 钢的加热及组织转变	86
第一节 材料性能依据	6	第二节 钢的冷却及组织转变	91
第二节 材料的使用性能	7	第三节 退火和正火	100
第三节 材料的工艺性能	22	第四节 淬火与回火	103
第四节 材料的环境性能	23	第五节 钢的表面热处理和化学热处理	
习题	24	工艺	113
第二章 材料的结构	25	第六节 热处理新技术和新工艺	120
第一节 结合键	25	习题	122
第二节 晶体结构理论	27	第七章 钢铁材料	124
第三节 晶体缺陷理论	31	第一节 钢中常存杂质元素对其性能的	
习题	34	影响	124
第三章 材料的凝固与结晶组织	35	第二节 合金元素在钢中的主要作用	125
第一节 概述	35	第三节 钢的分类与牌号	129
第二节 纯金属结晶	36	第四节 结构钢	131
第三节 合金的结晶与相图	40	第五节 工具钢	147
第四节 铸态组织与冶金缺陷	51	第六节 特殊性能钢	157
习题	53	第七节 铸铁	165
第四章 材料的变形断裂与强化		第八章 有色金属材料	177
机制	55	第一节 铝及其合金	177
第一节 材料的塑性变形	55	第二节 铜及其合金	185
第二节 金属的冷塑性变形	58	第三节 其他有色金属及合金	191
第三节 金属的热塑性变形	64	第四节 轴承合金	196
第四节 金属强化理论简介	67	习题	197
第五节 材料的断裂	69	第九章 高分子材料	199
习题	71	第一节 概述	199
第五章 铁碳合金相图及应用	73	第二节 高分子材料的性能	202
第一节 纯铁和铁碳合金中的相	73	第三节 常用高分子材料	204
第二节 铁碳合金相图分析	74	习题	214
第三节 铁碳合金成分、组织与性能的		第十章 陶瓷材料	216
关系及应用	82	第一节 概述	216
		第二节 陶瓷材料的结构和性能	216



第三节 陶瓷的生产工艺与粉末冶金	217	第三节 化学转化膜技术	257
第四节 常用陶瓷材料	220	第四节 表面涂敷技术	260
习题	223	第五节 气相沉积技术	265
第十一章 复合材料	224	第六节 高能束表面技术简介	268
第一节 概述	224	习题	269
第二节 增强材料及复合增强原理	226	第十四章 工程材料的选用与发展	270
第三节 常用复合材料	229	第一节 零件失效分析	270
习题	235	第二节 材料选择原则	272
第十二章 功能材料	236	第三节 典型零件选材与工艺分析	284
第一节 概述	236	第四节 材料与环境及可持续发展	295
第二节 电功能材料	238	第五节 新材料的发展趋势	297
第三节 磁功能材料	241	习题	300
第四节 热功能材料	244	附录	301
第五节 传感器用敏感材料	245	附录 A 材料工程主要相关国家标准	
第六节 智能材料与结构	248	名录 (摘)	301
习题	252	附录 B 材料学主要相关 Internet 信息	
第十三章 材料表面技术	253	资源 (摘)	303
第一节 概述	253	参考文献	306
第二节 电镀和化学镀	255		

绪 论

一、材料与材料科学

材料是人类文明与社会进步的物质基础与先导,是实施可持续发展战略的关键。材料作为能制造有用器件的物质,与能源和信息共同构成了人类社会赖以生存与发展的基本资源,故材料、能源和信息并列为现代科学和现代文明的三大支柱,且材料又是最重要的基础。

历史学家把人类社会的发展按其使用的材料类型划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代,而今已跨入人工合成材料的新时代。

从古猿到原始人类,石器一直是主要的工具,约在原始社会的末期,中华民族的祖先最早使用了火烧制陶器,到东汉时期又出现了瓷器,并先后传至世界各国,对人类文明产生了极大的影响,已成为中国古代文化的象征。

早在 4000 年以前,我们的祖先就已开始使用天然存在的纯铜,至殷、商时代,我国的青铜冶炼与铸造技术便已发展到了较高的水平,到春秋战国时期,我国人民认识并总结了青铜的成分、性能和用途之间的关系与规律。例如,在《周礼·考工记》中对青铜的成分和用途描述出来的“六齐”规律,是世界上最早的关于金属材料合金化工艺的总结。

到了汉代,我国“先炼铁后炼钢”的技术已居世界领先地位;从西汉到明朝,我国的钢铁生产技术、钢铁热处理技术及钢铁材料的应用都已达到了相当高的水平。北宋沈括的《梦溪笔谈》、明代宋应星的《天工开物》等科学史书中都有这方面的详细记载与论述。

18 世纪以欧洲为中心的世界工业迅速发展,对材料的品质、数量都提出了越来越高的要求,形成并推动了材料工艺的进一步发展。1863 年光学显微镜首次应用于金属的微观研究,出现了“金相学”,并在化学、物理、材料力学的基础上产生了一门新学科“金属学”。随着 1912 年 X 射线衍射技术和 1932 年电子显微分析技术及后来出现的各种谱仪的应用,“金属学”便日趋完善,大大推动了金属材料及其学科的研究与发展。

20 世纪以来,随着现代科学技术和生产的迅速发展,对材料的要求也越来越高。在大量发展高性能金属材料的同时,又迅速发展和应用了高性能的高分子材料、陶瓷材料和复合材料,并进入人工合成材料的新时代。因此,在一些与材料有关的学科(如化学、物理等)的基础上,逐步形成了跨越金属学、高分子科学、陶瓷学等多学科的材料科学。

材料科学是研究各种材料的成分、组织、性能和应用之间的关系及其规律的一门科学,它包含四个基本要素:材料的成分组织结构、材料的制备合成与加工工艺、材料的固有性能和材料的使用行为。这说明材料科学不仅着眼于基础理论的研究,也考虑了应用实践。这一关系与规律的表达最早来自且应用于金属材料,但现也同样应用于其他材料,对各种材料而



言, 其研究原理、思路与方法是基本相通的。

多数发达国家都非常重视材料科学研究。例如, 美国的研究机构、企业和大学均有许多课题进行材料研究, 据 1972 年美国国家科学院的白皮书报告, 全美科技人员有 25% 从事材料问题的研究, 而且有 25% 以某种形式参与材料的研究; 1986 年《科学美国人》杂志在专期讨论有关材料研究的文章中指出“材料科学的进展决定了经济关键部门增长速率的极限范围”; 1990 年美国总统的科学顾问更是明确地说“材料科学在美国是最重要的学科”; 美国的许多技术性问题正是通过采用新开发的材料来解决的, 如高性能飞机就是突出的例子。在世界范围内, 高新材料技术是高科技发展的一个关键领域, 起着先导和基础的作用, 常被视为高技术发展的突破口。

1978 年我国科学大会将材料科学技术列为 8 个新兴的综合性的科学技术领域之一, 此后各个五年计划中, 一直把材料科学技术作为重点发展的领域之一; 在“863 国家高技术研究发展计划”“973 国家重点基础研究发展规划”中都给予了高度重视。新材料作为高新技术产业的组成部分, 在 1999 年颁布并实施《当前国家优先发展的高技术产业化重点领域指南》中得到重点扶持, 并在 2000 年开始执行《国家计委关于组织实施新材料高技术产业化专项公告》中明确其发展对国民经济有重要支撑作用。“十三五规划”规定, 突破关键基础材料瓶颈, 发展高端材料至关重要。

二、材料的分类与概况

工程材料是指固体材料领域中与工程(结构、零件、工具等)有关的材料, 主要应用于机械制造、航天航空、化工、建筑与交通等部门, 依据不同的分类方法, 工程材料的种类繁多。按其应用领域可分为机械工程材料、建筑工程材料、电子工程材料、航空材料等。按其性能特点可分为结构材料和功能材料: 结构材料以力学性能为主, 兼有一定的物理、化学性能; 功能材料是以特殊的物理、化学性能为主, 如电、磁、光、热、声学、生物等功能和效应及其转换特性的材料。结构材料用量极大, 是当代社会的主要材料, 也是本书讨论的重点; 功能材料目前用量虽小, 但却是高新技术的关键, 是知识密集、技术密集、附加值高的新材料。

工程上通常按材料的化学属性将材料分为金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料四大类。

(一) 金属材料

金属材料是用量最大、用途最广的主要工程材料, 历来占据材料消费的主导地位, 并预计在未来的相当长时间内还将延续下去。它包含两大类型: 黑色金属和有色金属。

1. 黑色金属

指铁、铬、锰及其合金。其中铁基合金即为钢铁材料, 它占金属材料总量的 95% 以上。钢铁材料又分为钢与铸铁两种, 其中钢占 90% 以上。在 20 世纪 30~50 年代, 钢铁材料处于最鼎盛时期, 是材料科学技术的中心。随着钢铁材料的强度和质量的提高, 以及现代高新技术对特殊性能材料(如陶瓷、高分子、复合材料)的需求增加, 钢铁材料虽已走过了它最辉煌的时代, 但因其具有良好的力学性能、工艺性能和低成本等综合优势, 使之在 21 世纪仍占据主导地位, 故绝不是“夕阳产业”。



2. 有色金属

指除黑色金属以外的所有其他金属。它又可分为轻金属（如铝、镁、钛）、重金属（如铅、铋）、贵金属（如金、银、镍、铂）和稀有金属等。其中以铝及其合金、铜及其合金应用最广。

（二）高分子材料

高分子材料又称为聚合物，是由相对分子质量很大的大分子组成的，其主要原料是石油化工产品。按其性能用途和使用状态，又分为塑料、橡胶、合成纤维、涂料和胶粘剂等类型。

塑料是最主要的高分子材料，常分为通用塑料和工程塑料。通用塑料主要用于制作薄膜、容器和包装用品，占塑料生产的70%左右，聚乙烯是其典型代表。工程塑料是指力学性能较高的聚合物，聚酰胺（尼龙）是这类材料的代表。由于高分子材料具有金属材料所不具备的某些优异性能（如重量轻，电绝缘性、隔热保温性、耐蚀性好等），故其发展速度相当快。

（三）陶瓷材料

陶瓷材料是指硅酸盐、金属与非金属元素的化合物（主要是氧化物、氮化物、碳化物等）。工业上常分为三大类，其一是传统陶瓷，由黏土、石英、长石等组成，主要成分是天然硅、铝的氧化物及硅酸盐，常用作建筑材料使用；其二是特种陶瓷（新型陶瓷），主要成分是人工氧化物、碳化物、氮化物和硅化物等的烧结材料，常用作工业上耐热、耐蚀、耐磨等零件；其三是金属陶瓷，即金属粉末与陶瓷粉末的烧结材料，主要用作工具、模具等。

陶瓷具有许多优异的性能，如高硬度、高耐磨性、高的抗压强度、高的耐热性和耐蚀性能，其最大缺点是塑性低、易脆断且不易加工成形，故限制了它作为结构材料的使用范围；对陶瓷结构材料的增强增韧是今后的主要研究课题。此外，由于陶瓷具有独特的光、电、热等物理性能，因而是主要的功能材料之一。

（四）复合材料

金属、高分子、陶瓷材料各有优缺点，若将以上两种或两种以上的材料微观地组合在一起形成的材料，便是复合材料。复合材料发挥了其组成材料的各自长处，又在一定程度上克服了它的弱点，因而是一种新型的优异材料。按其基体不同，复合材料常分为三大类型：树脂基复合材料、金属基复合材料和陶瓷基复合材料。现代工业中，树脂基复合材料（如玻璃钢）已处于成熟应用阶段，金属基复合材料和陶瓷基复合材料因其制造工艺复杂、成本高昂，仍处于研究、推广应用阶段。

三、材料科学与机械工程

机械工程是一个含义极广的概念，它几乎涉及了国民经济各个领域中的所有机械产品。随着经济高速高效的发展及科学技术的不断进步，机械工程将朝着大型及微型、高速、耐高低温、耐高压、耐恶劣环境影响等方向发展，这就要求机械产品的技术功能优异，质量高而稳定，寿命长而可靠，成本低而效益高。优质的机械产品是合理的材料、优良的设计和正确的加工这三者的整体配合，而材料又是其基础。

（一）材料与产品质量

材料为产品提供了必要的基本功能，是产品质量的重要保证。大量事实说明：在设计与



加工过程中,许多材料及其工艺问题是我国机械产品功能差、质量低、寿命短的主要原因之一,故要求机械工程技术人員掌握必要的材料科学与材料工程知识。

(二) 材料与机械设计

机械设计涉及广泛的学科领域,其中数学、材料科学、工程力学和工业造型是其重要支柱。在设计某一具体产品时,设计者首先进行的是功能设计和结构设计,通过精确的计算和必要的试验,以确定决定产品功能的技术参数和整机及零件的形状、尺寸,上述参数的选定及零件尺寸形状的设计质量如何,往往比较直观且容易评定和校验。至于每一零件根据其不同的服役条件选用何种材料,经过哪些加工工艺制成,最后在使用状态下的显微组织是什么,能否在规定寿命期限内正常工作等问题的处理方法,则随设计者的材料科学知识水平与技能的不同,有着很大的差别。在我国工程界,机械设计师多半是依据经验来套用而非选用材料;更有甚者,连套用都做不到而是随意取用,盲目性极大;至于正确决定使用状态的显微组织,则更是做不到。由此而造成的产品质量与寿命问题,已被大量的产品事故所证实。

因此,机械工程师不仅要能进行优良的功能设计和结构设计,同时还要能做好材料设计——即正确选择材料及其加工工艺,它的任务是通过选定适当化学成分的材料,经合理的加工工艺过程来获取满足产品使用要求的内部组织结构。产品的功能设计、结构与材料设计应是紧密结合而完全融为一体的。

(三) 材料与机械制造

机械制造是将材料经济地加工成最终产品的过程。依据机械制造的各种工艺的作用,可将其分为两大类。

1. 改形工艺

即以保证设计所要求的结构形状与尺寸为主要目的的工艺,又称为成形工艺,它包括切削成形(如车、铣、刨、磨、钻等)、流动成形(如铸造成形、塑性成形等)、连接成形(如焊接、铆接、粘接等)三大类。改形工艺的难易程度(即工艺性能)既受材料性能的影响,反过来改形工艺过程又会不同程度地影响到零件的内部组织,进而影响材料的使用性能;其中铸造成形、塑性成形与焊接成形过程对材料的组织与性能的影响程度极大,应予以高度重视。

2. 改性工艺

即以保证设计所要求的零件组织性能为目的的工艺,此为本课程的重点之一,它包括材料整体处理工艺(如退火、正火、淬火、回火、时效等)和材料表面改性处理工艺。表面处理工艺是近代材料科学研究的重要方向之一,它对提高产品质量和寿命,挖掘现有传统材料的潜力均具有突出的技术经济效益,特别是对提高零件疲劳性能、耐磨性、耐蚀性等方面有更为显著的效果,故应得到广泛的重视和应用。

在机械制造过程中,不同的材料有着各自适宜的加工工艺,这直接关系到产品的生产率,也影响了产品的性能与质量,故要求在材料设计的同时,就必须考虑其加工工艺方法。材料科学与工程的进步,既保证了优质高效产品的实现,也推动着机械制造工艺的不断发展,并导致了新兴产业的形成;反过来,先进的制造技术与装备,也推动着材料科学的发展。材料是机械工程的基础,要改变“重整机、轻零件,重设计与制造、轻材料”的错误倾向,这既是一种技术改革,更重要的是一种观念的更新。



四、本课程的目的、内容与学习要求

机械工程技术人员在从事产品设计、制造、运行、维护等工作时，都必然要对工程材料的选择、应用与加工等问题进行科学系统的分析并予以全面正确的解决。这就要求同时具备两方面的材料学知识：其一是应该了解材料的成分、结构、工艺及外界条件（如载荷、温度、环境介质等）改变时对其性能的影响，其二是应该掌握各种工程材料（重点是金属材料）的基本特性和应用范围。“机械工程材料”课程正是为实现这一要求而设置的。

“机械工程材料”是机械类专业的一门重要技术基础课，其目的是使学生获得有关工程结构与机械零件常用的各种工程材料的基本理论知识和性能特点，从而使其初步具备合理选择材料和使用材料，正确选择加工方法及安排制订加工工艺路线的能力，且为后续有关课程的学习奠定必要的材料学基础。

本课程的内容包括：①材料的各种性能及应用意义（第一章）；②材料科学与工程的基本理论和基本知识（第二至第六章、第十三章）；③常用各种工程材料的基本知识、特性与应用（第七至十二章）；④工程材料的选用（第十四章）。

“机械工程材料”课程是一门理论性和实践应用性很强的课程。它以物理、化学、工程力学及金属工艺学和金工教学实习为基础，在学习时应注意联系上述课程的有关内容，并结合生产应用实际，注重分析、理解与运用，强调前后知识的整体联系与综合应用，以达到提高发现问题、分析问题和解决问题的独立创新工作能力。此外，还应加强材料科学与社会科学之间的联系，以丰富和提升该课程的学习价值。

第 一 章

材料的性能及应用意义

材料是人类社会经济地制造有用器件的物质。所谓有用,是指材料满足产品使用需要的特性,即使用性能,它包括力学性能、物理性能和化学性能;制造是指将原材料变成产品的全过程,材料对其所涉及的加工工艺的适应能力即为工艺性能,它包括铸造性能、塑性加工性能、切削加工性能、焊接性能和热处理性能等。全面地理解材料性能及其变化规律,是机械设计、选材用材、制订加工工艺及质量检验的重要依据;作为材料性能的两个方面,使用性能和工艺性能既有联系又有区别,两者有时是统一的,但更多的情况下却是互相矛盾的。合理地解决两者间的矛盾并使之不断改善和创新,是材料研究与应用的主要任务之一。

本章主要介绍工程材料各种性能(重点是力学性能)的物理意义、技术指标及其应用。

第一节 材料性能依据

材料的性能是一种参量,用于表征材料在给定的外界条件下所表现出来的行为。材料本身是一个复杂的系统,它包含材料的化学成分和内部结构。材料的化学成分和内部结构是性能的内部依据,而性能则是指确定成分和结构的材料的外部表现。这里的结构是一个广泛的概念,它包括原子结构、结合键、原子排列方式(晶体、非晶体与晶体缺陷)以及组织(显微组织与宏观组织)四个层次。由于材料的性能一般必须量化表示,因而它通常是依照标准规定通过不同的试验来测定表述的,这便是我们从材料手册或设计资料上获得的性能参数。实际工件的性能首先取决于材料的性能,但须考虑到工件的形状尺寸、加工工艺过程和使用条件对其重要的影响。

材料科学与工程是依据“工艺→结构→性能”这条思路去控制或改变材料的性能,即工艺影响结构、结构决定性能。在此,“工艺”主要是指材料的制备和加工工艺,但也应考虑材料在使用过程中结构的可能变化以及由此而对性能产生的影响。

在改变结构时,应注意它的可变性以及因这种改变对于性能改变的敏感性。有些结构是难于改变的,如原子结构;有些结构虽然可以通过工艺来改变,但性能改变的敏感性却不同。某些性能如熔点、弹性模量主要取决于成分而对其结构改变不敏感,便称之为结构不敏感性能,而强度、塑性、韧性等性能对结构的改变非常敏感,则称之为结构敏感性能。这是选择材料和制订加工工艺所必须考虑的问题。

例如,弹簧的弹性、刚性及疲劳强度是其主要要求,选择不同成分(碳及合金元素含量)的弹簧钢并经过不同的加工工艺(如冷热塑性加工、热处理、表面喷丸等)来改变内部结构,弹簧的弹性与疲劳性能有着明显的不同,而其刚性却差异甚微。这说明对弹簧而



言，试图用工艺去改变组织结构不敏感性能——刚性，显然是徒劳无功的，即便是将碳素弹簧钢改造成合金弹簧钢，刚性也无明显改善，其原因是碳钢与合金钢均是以 Fe 为主的材料，而材料的刚性主要取决于其内主要成分，次要成分的微小变化对它影响不大。

第二节 材料的使用性能

材料是在不同的外界条件下使用的，如在载荷、温度、介质、电磁场等作用下将表现出不同的行为，此即材料的使用性能，包括力学性能、物理性能和化学性能。由于工程结构与机器零件以传递力和能、实现规定的机械运动为主要功能，故力学性能是最主要的。

一、力学性能

力学性能是指材料在载荷（外力）作用下所表现出的行为，通过不同的标准试验测定的相关参量的临界值或规定值，即可作为力学性能指标。力学性能的类型依据载荷特性不同而不同，若按加载方式不同可分为拉伸、压缩、弯曲、扭转和剪切等性能，若按载荷的变化特性不同又可分为静载荷力学性能和动载荷力学性能等。不论何种情况，材料在外力作用下均会产生形状与尺寸的变化——变形。依照外力去除后变形能否恢复，变形可分为弹性变形（可恢复的变形）和塑性变形（不可恢复的残余变形）。当变形到一定程度而无法继续进行，材料便发生断裂。断裂前有明显宏观塑性变形的称为韧性断裂，反之则称为脆性断裂。

材料的变形与断裂是其受到外力作用时所表现出的普遍力学行为，试验测定的力学性能指标也很多，常用的有强度、刚度、弹性、塑性、硬度、韧性、疲劳性能和耐磨性等。

（一）强度

广义的强度是指材料在外力作用下对变形与断裂的抵抗能力。若将断裂看成为变形的极限，则可将强度简称为变形的抵抗能力。通常强度是依据相关标准规定进行静拉伸试验而得的。

在拉伸试验中，通过自动记录仪可得到试样上所受力 F 与其绝对伸长量 ΔL 的关系曲线，即力-伸长曲线。为排除试样原始尺寸对 F - ΔL 曲线的影响，经数学处理后即可得到工程上常用的应力 R 和应变 e 的关系曲线，即应力-应变曲线。图 1-1a、b 分别为典型的力-伸长曲线和应力-应变曲线。

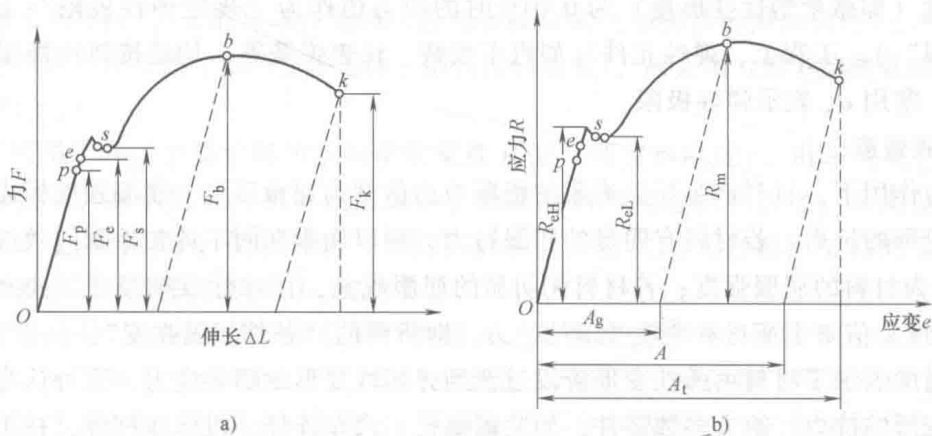


图 1-1 拉伸试验曲线

a) 典型的力-伸长曲线 b) 应力-应变曲线



由图 1-1 可知：在力较小的 Oe 段，试样的变形 (ΔL) 随力增加而线性增加，若除去外力后则变形完全恢复，故 Oe 阶段为弹性变形阶段。外力超过 F_e 后，试样进入弹性-塑性变形阶段，此时若除去外力，则变形不可完全恢复（弹性变形可恢复、塑性变形则成为不可恢复的永久变形）。当力达到 F_s 时，试样产生屈服现象——外力不增加而变形量明显继续增加。超过 s 点后，随着应力的提高，塑性变形逐渐增加，并伴随着形变强化现象，即变形需要不断增加外力才能继续进行，在 $s \sim b$ 点之间，试样发生的是均匀塑性变形。当力达到并超过 F_b 之后，试样开始产生不均匀的集中塑性变形即缩颈，并随着变形的继续伴有力下降现象。当达到 k 点时，试样于缩颈处发生断裂。

综上所述，典型的力-伸长曲线（如低碳钢试样）表征的力学行为可分为弹性变形阶段（ Oe 段）、弹塑性变形阶段（ ek 段）和断裂阶段（ k 点），其中弹塑性变形阶段又可细分为屈服塑性变形（ es 段）、均匀塑性变形（ sb 段）和不均匀集中塑性变形（ bk 段），但并非所有材料的力-伸长曲线均有以上明显的全部特征。例如，塑性极低的铸铁或淬火高碳钢、陶瓷等材料则几乎只有弹性变形阶段，这说明材料的成分和组织结构不同，在相同试验下所表现出来的力学行为有着明显的差异。

通过拉伸试验，可以从应力-应变曲线上得到一些有价值的临界或规定的点来确定材料的一系列强度指标。由于一般强度是指对塑性变形的抗力，依照塑性变形量的允许程度不同，则有以下强度指标。

1. 比例极限

在弹性变形阶段，应力和应变关系完全符合胡克定律的极限应力即为比例极限。如火炮炮筒，为保证炮弹的弹道准确性，则要求炮筒只能产生弹性变形且其变形与应力之间应严格保持正比关系，若应力超过比例极限，炮筒则会产生超过允许的微量塑性变形，炮弹就会偏离射击目标，故炮筒设计时应采用比例极限。常用 σ_p 表示比例极限。

2. 弹性极限

弹性极限是指在完全卸载后不出现任何明显的微量塑性变形的极限应力值，当应力低于弹性极限时，应变和应力之间可能已丧失了严格的正比关系，但变形基本上可恢复而微量残余变形不明显。因此，弹性极限受测量仪器的精度影响而难于确定，故国家标准一般规定以残余应变量为（即微量塑性变形量）为 0.01% 时的应力值作为“规定弹性极限”（或称“条件弹性极限”）。工程上，弹性元件（如汽车板簧、仪表弹簧等）均是按弹性极限来进行设计选材的。常用 σ_e 表示弹性极限。

3. 屈服强度

在外力作用下，材料产生屈服现象的极限应力值即为屈服强度。屈服强度标志着材料对起始塑性变形的抗力。若材料有明显的屈服行为，则以屈服期间不计初始瞬间效应时的最小应力 R_{eL} 作为材料的屈服强度；若材料无明显的屈服现象，国家标准则规定以残余应变量为 0.2% 的应力值来表征材料塑性变形的抗力，即所谓的“条件屈服强度”，记作 $R_{p0.2}$ 。

屈服强度表示了材料由弹性变形阶段过渡到弹塑性变形的临界应力，这可认为是材料对明显塑性变形的抗力。绝大多数零件，如紧固螺栓、汽车连杆、机床丝杠等，在工作时都不允许明显的塑性变形，否则将丧失其自身精度或使与其他零件的相对配合受到影响，故屈服强度是其设计与选材的主要依据之一。



4. 抗拉强度

材料在受力过程中能承受的最大载荷 F_b 处对应的应力值即为抗拉强度 R_m 。对塑性较好的材料, R_m 表示了材料对最大均匀变形的抗力; 而对塑性较差的材料, 一旦达到最大载荷, 材料立即发生断裂, 故 R_m 也是其断裂抗力 (断裂强度) 指标。不论何种材料, R_m 均是其最大允许承载能力的度量, 且因 R_m 易于测定, 故适合于作为产品规格说明或质量控制的标志, 广泛出现在标准、合同、质量证明等文件资料中。 R_m 在设计选材中的应用不及 $R_{p0.2}$ 普遍, 但如钢丝绳、建筑结构件等对塑性变形要求不严而仅要求不发生断裂的零件, R_m 就是其设计与选材参数。

所有以上强度指标均可作为设计与选材的依据, 为了应用的需要, 还有一些从强度指标派生出来的指标: ①比强度。它是各种强度指标与材料密度之比, 在对零件自身重量有要求或限制的场合下 (如航天航空构件、汽车等运行机械), 比强度有着重要的应用意义。②屈服比。它是材料屈服强度与抗拉强度之比, 表征了材料强度潜力的发挥利用程度和其零件工作时的安全程度。

应强调指出的是: 材料强度指标是其组织结构敏感性参数, 合金化、热处理及各种冷热加工可在很大程度上改变它的大小。

(二) 刚度

1. 概念

绝大多数机器零件在工作时基本上都是处于弹性变形阶段, 即均会发生一定量的弹性变形。但若弹性变形量过大, 则工件也不能正常工作, 由此引出了材料对弹性变形的抵抗能力——刚度 (或刚性) 指标。如果说强度保证了材料不发生过量塑性变形甚至断裂的话, 刚度则保证了材料不发生过量弹性变形, 从这个角度来看, 刚度和强度具有相同的技术意义而同等的重要, 因而机械设计时既包括强度设计又包括刚度设计。

在应力-应变曲线上的弹性变形阶段, 应力与应变的比值即为材料刚度, 也就是材料的弹性模量, 它在数值上等于该直线的斜率即 $\tan\alpha$, 常用的有弹性模量 E 。实际工件的刚度首先取决于其材料的弹性模量 E , 又与该工件的形状和尺寸 (如截面积) 及加载方式有关, 故工件刚度代表了工件产生单位弹性变形所需的应力大小。刚度的对立面是挠度, 即在外力作用下工件产生的弹性变形量。设计与选材中刚度之所以重要, 至少有以下的原因: 一是它与稳态挠度有关 (如镗床的镗杆); 二是与弹性能的储存与吸收有关 (如弹簧等弹性元件); 三是与失稳引起的不能正常工作有关 (如薄壁件扭曲、细长压杆屈曲), 故必须考虑影响刚度的因素。

2. 影响因素

表 1-1 列举了各类主要材料的室温弹性模量 E 值 (即材料刚度)。由表可见, 不同材料的刚度差异很大, 其中陶瓷材料的刚度最高, 金属材料与复合材料次之, 而高分子材料最低。在常用的金属材料中, 钢铁材料又最好, 铜及其合金次之 (为钢铁材料的 $2/3$ 左右), 铝及其合金最差 (为钢铁材料的 $1/3$ 左右)。

应该指出的是, 对应用最广的金属材料而言, 其弹性模量 E (刚度) 主要取决于基体金属的性质, 当基体金属确定时, 难于通过合金化、热处理、冷热加工等方法使之改变, 即 E 是结构不敏感性参数, 如钢铁材料是 Fe 基合金, 不论其成分和组织结构如何变化, 室温下的 E 值为 $(20 \sim 21.4) \times 10^4 \text{ MPa}$ 。而陶瓷材料、高分子材料、复合材料的弹性模量对其成分和组织结构是敏感的, 可以通过不同的方法使其改变。



表 1-1 各类主要材料的室温弹性模量 E

(单位: 10^4MPa)

材 料			材 料		
E			E		
陶瓷材料	金刚石	102	复合材料	碳纤维复合材料	7~20
	硬质合金	41~55		玻璃纤维复合材料	0.7~4.6
	Al_2O_3	40		木材(纵向)	0.9~1.7
金属材料	钢(碳钢、合金钢)	20~21.4	高分子材料	聚酯塑料	0.1~0.5
	铸铁	17.3~19.4		尼龙	0.2~0.4
	铜及其合金	10.5~15.3		橡胶	0.001~0.01
	铝及其合金	7.0~8.1		聚氯乙烯	0.0003~0.001

(三) 弹性

材料的弹性是用来描述在外力作用下材料发生弹性行为的综合性能指标, 前已述及的比例极限 σ_p 、弹性极限 σ_e 和弹性模量 E 等在一定的程度上均可用来说明材料的弹性性能。但作为弹性元件(如各种弹簧、音叉等)的材料, 最直接的弹性性能指标尚有以下几个必须予以考虑(见图 1-2)。

1. 最大弹性变形量 ϵ_e

ϵ_e 是材料在外力作用下所能发生的最大可恢复变形量, 即弹性变形能力, 它是对应于弹性极限 σ_e 时的弹性变形量, 其数值 $\epsilon_e = \sigma_e / E$ 。由此可见, 高弹性极限、低弹性模量的材料具有较好的弹性。高分子材料的 E 值均很低, ϵ_e 值虽较大但它却不是工程上最好的弹性元件材料, 这说明 ϵ_e 尚不是最合适的弹性性能指标。

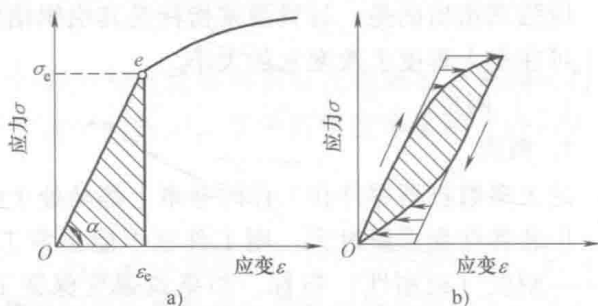


图 1-2 弹性比功与滞弹性行为
a) 弹性比功 b) 滞弹性行为

2. 弹性比功

弹性比功是材料吸收变形功而不发生永久变形的能力, 即弹性变形时吸收的最大弹性功, 它可用应力-应变曲线中弹性变形部分所围成的面积(图 1-2a 中阴影部分)来表示, 即弹性比功 $= \sigma_e \epsilon_e / 2 = \sigma_e^2 / (2E)$ 。由此可见, 提高材料的弹性极限 σ_e 或降低弹性模量 E , 弹性比功值将增大, 材料的弹性就越好。应注意的是, 由于 σ_e 是二次方, 故提高 σ_e 对改善材料弹性的作用更明显。

实际工作中的弹簧, 其主要作用是缓冲、减振和储能传递力, 故要求它既应有较高的弹性以吸收大量的弹性变形功, 又不允许发生塑性变形。虽然较低的弹性模量 E 对提高弹性有利, 但这类材料(如高分子材料、低熔点金属)的弹性极限也很低, 因此工程上弹簧一般选用弹性模量虽高, 但弹性极限也很高的材料(如钢)来制造。某些仪表上常用的青铜(如铍青铜)既具有较高的弹性极限 σ_e , 又具有较小的弹性模量 E , 加之其具有顺磁性和耐腐蚀性等特点, 因而也是一种较佳的弹簧材料。

3. 滞弹性(弹性滞后)

理想的弹性材料在加载时立即产生弹性变形, 卸载后立即恢复变形, 两者是完全同步的。但实际工程材料, 如金属, 特别是高分子材料, 加载时应变不立即达到平衡值, 卸载时



变形也不立即恢复,这种应变滞后于应力的现象称为滞弹性或弹性滞后。它可用应力-应变曲线上弹性滞后环的面积(见图1-2b中阴影部分)来表示。

材料的滞弹性具有重要的实际应用意义。易受振动且要求消振的零件,如机床床身和汽轮机叶片,要求其材料具有良好的消振性。机床床身可用灰铸铁制造,汽轮机叶片则采用Cr13型钢制造。而对仪表上的传感元件和音响上的音叉、簧片等,则不希望有滞弹性出现,故在选材时应注意。

(四) 塑性

1. 概念

塑性是指材料在外力作用下产生塑性变形而不被破坏的能力,即材料断裂前的塑性变形的能力,如在拉伸、压缩、扭转、弯曲等外力作用下所产生的相应塑性变形都可用来表示材料的塑性。但材料的塑性一般是在静拉伸试验中测定的,常用试样拉断后的伸长程度(断后伸长率 A)和断面的收缩程度(断面收缩率 Z)来表示。由于断后伸长率 A 测定较方便,故工程上应用较广;但考虑到材料塑性变形时可能有缩颈行为,故断面收缩率 Z 能较真实地反映材料的塑性好坏。

2. 塑性指标的应用意义

虽然材料的塑性指标一般不直接用于机械设计计算,但设计师往往要对所用材料提出一定的塑性要求,这是因为:①由于零件不可避免地存在截面过渡、沟槽、油孔及表面粗糙不平滑的现象,受到载荷作用时,这些部位会出现应力集中,故材料的塑性有保证通过此部位的局部塑性变形来削减应力峰,缓和应力集中的作用,从而防止零件出现未能预测的早期破坏;②大多数材料(主要是金属材料)均具有形变强化能力,故而在遭受不可避免的偶然过载时,发生塑性变形和因此而引起的形变强化可保证零件的安全以避免断裂,即具有抵抗过载的能力;③零件若遭受意外过载或冲击时,可发生塑性变形过渡而不是直接发生突然断裂,即便最终要断裂,但在此之前也要吸收大量的能量(即塑性变形功),这一切对避免灾难性事故的发生至关重要;④材料具有一定的塑性可保证某些成形工艺(如冲压、轧制、冷弯、校直、冷铆)和修复工艺(如汽车外壳或挡泥板受碰撞而凹陷)的顺利进行;⑤塑性指标还能反映材料的冶金质量的好坏,故是材料生产与加工质量的标志之一。

材料的塑性与其强度指标一样,也是结构敏感性参数,可通过各种方法使之改变。顺便要指出的是,金属材料之所以在过去、现在乃至将来都有广泛的应用,其主要原因之一并不是它的强度,而恰恰在于其良好的塑性。

(五) 硬度

硬度是反映材料软硬程度的一种性能指标,它表示材料表面局部区域内抵抗变形或破裂的能力,是表征材料性能的一个综合参量。测定硬度的试验方法有十多种,但基本上可分为压入法和刻划法两大类,其中压入法较为常用。

硬度试验至少有以下优点,从而导致了它在生产和研究中的广泛应用。①设备简单,操作迅速方便;②试验时一般不破坏成品零件而无须加工专门的试样,试验对象可以是各类工程材料和各种尺寸的零件;③硬度作为一种综合的性能参量,与其他力学性能如强度、塑性、耐磨性之间的关系密切,由此可按硬度估算强度而免做复杂的拉伸试验;④材料的硬度还与工艺性能有联系,如塑性加工性能、切削加工性能和焊接性能等,因而可作为评定材料工艺性能的参考;⑤硬度能较敏感地反映材料的成分与组织结构的变化,故可用来检验原材